

강제석유저장탱크(KS B 6225)의 내진설계기준 개선 안

박종률[†] · 오택열^{*}

(2001년 8월 30일 접수, 2002년 1월 14일 심사완료)

Seismic Design Guidelines for Welded Steel Oil Storage Tank (KS B 6225)

Jong-Ryul Park and Taek-Yul Oh

Key Words: Impulsive Pressure(충격압), Convective Pressure(이류압), Sloshing Frequency(요동진동수), Seismic Overturning Moment(지진전도모멘트), Buckling(좌굴)

Abstract

Recommended seismic design guide for the flat bottom vertical-cylindrical oil storage tanks in KS B 6225 is presented. Under earthquake excitations, the hydrodynamic pressure exerted on the tank walls produces overturning moment which may cause either a failure of the anchors or a buckling of the tank shell near its base. The basis for establishing design loads due to hydrodynamic pressure is described including seismic zone risk map in Korea, zone coefficients and the essential facilities factor. This procedure for calculating applied compressive stress on the shell base subjecting to seismic load and for estimating the allowable buckling stress is described.

1. 서론

액체를 저장하는 여러 다른 구조물 중에서 지반에 지지되어 있고 밀판이 평평한 얇은 두께로 된 직립 원통 탱크는 저장액체에 의해 생기는 유체 정압을 지지하는데 매우 효과적이기 때문에 세계적으로 가장 널리 사용되고 있다.

과거 수년간 액체 저장 탱크가 지진으로 파손된 사례들^(1~8)에서 다음과 같은 파손 형태를 알 수 있다. (1) 탱크 옆판의 좌굴, (2) 밀판의 파손, (3) 앵커가 있는 곳의 탱크 옆판의 파단, (4) 앵커의 파손, (5) 지붕의 파손, (6) 전체 붕괴, (7) 기초의 부분 침하에 의한 파손, (8) 흔들림에 의해

기초에서 미끄러지거나 이탈, (9) 배관 연결부위 파손 등이다.

관찰된 파손 중에서 가장 일반적이고 많은 사례는 전도력에 의해 발생한 수직방향 압축응력이 탱크 옆판의 바닥부근에서 일으키는 좌굴에 의한 파손과 유체 요동에 의해 탱크의 지붕과 탱크의 최상단 옆판 그리고 지붕을 지지하는 내부의 기둥의 손상이다.

다행히 한국 내에서는 지진에 의한 탱크의 파손 사례는 아직 보고되지 않고 있으나 최근 한반도 내에서도 산업시설물이 파손될 수 있는 리히터 규모(Richter magnitude) 4 이상의 지진이 발생되고 있어 지진에 대한 액체저장탱크의 안전도를 심각히 고려해야 한다.

저장탱크에 대한 각국의 설계규격들, 예를 들면 미국의 API standard 620, API standard 650, AWWA D 100, 일본의 JIS B 8501 등에는 자국의 지진 상황에 적합한 내진설계 기준 및 절차를 명기하고 있다. 그러나 한국 산업규격 KS B 6225(강제석유저장탱크의 구조)에서는 탱크 몸통

[†] 책임저자, 회원, 현대엔지니어링(주)

화공플랜트사업부 기계부

E-mail : jrpark@hec.co.kr

TEL : (02)2166-8212 FAX : (02)2649-9387

^{*} 회원, 경희대학교, 기계산업시스템부

의 강도 설계시, 지진시의 액면 요동과 동압을 고려하여야 한다고 명시하고 있으나 구체적인 수식과 명확한 규정이 없는바 이에 필요한 기초이론의 정립과 보완된 내진설계기준안의 마련이 시급한 실정이다.

내진설계 기준 및 절차에 대한 연구는 Wozniak과 Mitchel,⁽⁵⁾ Poole,⁽⁷⁾ Haroun, El-Zeiny, and Bhatig,⁽⁹⁾ 그리고 鶴戶口⁽¹⁰⁾ 등이 있다.

구조물의 내진설계방법⁽¹¹⁾은 보수적인 방법인 등가정적해석(equivalent static analysis)과 동적해석으로 대별되고 동적해석에는 응답스펙트럼해석과 시간이력해석이 있다. 액체저장탱크에 대해서는 일반적으로 선진국 혹은 국제원자력기구에서도 보수적인 방법인 등가정적해석을 채용하고 있고, 특정구역에 대한 지반감쇠를 고려해야 할 경우는 동적해석을 병행하고 있다. 때문에 미국의 API standard 650 및 일본의 JIS B 8501에서도 보수적인 내진설계기준을 채용하고 있다.

따라서 본고에서도 보수적인 설계방법을 채용하여 국내실정에 적합한 액체저장탱크의 내진설계절차 및 기준안을 제시하여 KS B 6225의 개선에 기여하고자 한다.

2. 설계기준안의 범위

액체저장탱크의 내진설계에 대한 기본개념은 지진에 견딜 수 있도록 강도, 강성 및 연성으로 명기할 수 있는 계의 능력을 평가하는 것이다.

앵커가 설치된 탱크의 경우, 지진에 의한 주요 파손은 탱크 옆판의 바닥 근처에서 발생하는 코끼리 발형 좌굴(elephant foot buckling), 다이아몬드형 좌굴(diamond buckling), 그리고 간혹 앵커볼트가 늘어나는 것이다. 이러한 파손 형태는 지진 시 탱크 옆판과 밀판 위에 있는 유체로 인해 발생한 전도 모멘트에 의한 것이다.

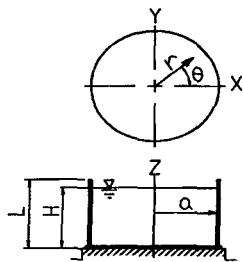


Fig. 1 Cylindrical tank and coordinate system

따라서 탱크의 지진에 대한 안전도를 평가하는 주 관심은 전도 모멘트와 이 모멘트를 견딜 수 있는 옆판의 강도이다.

앵커가 설치되지 않은 탱크는 탱크 밀판과 탱크를 지지하는 구조물 사이의 마찰에 의한 바닥 전단을 견디어야 한다. 비록 앵커가 된 탱크가 미끄러진 경우가 실험에서는 지적되지 않았더라도 미끄럼(전단)을 지지할 수 있는 가능한 마찰력을 확인하는 것이 중요하다.

탱크 옆판면 위에 작용하는 유체 정압과 유체 동압은 모두 탱크 옆판에 원주인장응력을 일으킨다. 실험에 의하면 지진에 의해서 생긴 원주응력에 의한 파손사례는 지적되지 않고 있다. 원주응력은 탱크 옆판의 수직방향 좌굴 용량에 영향을 미치는 것이다.

유체요동높이보다 높은 자유공간이 없어 유체 요동에 의해 탱크 지붕 혹은 탱크 옆판의 최상단이 좌굴되는 경우도 있다.

그러므로 탱크의 내진 수용력(seismic capacity)은 좌굴수용력, 앵커 강도 및 미끄럼에 대한 저항수용력이다. 지진력이 이러한 내진 수용력을 초과하는 경우 내진설계가 고려되어야 한다. 내진 수용력의 계산으로부터 설계자는 탱크가 견딜 수 있는 최대 안전 지진 운동을 추정할 수 있다.

3. 설계하중

3.1 충격력 및 이류력 함수의 해에 의한

액동압, 전단력, 전도모멘트 및 액체요동높이 밀판이 평평하고 원통인 액체저장탱크의 구조 및 좌표계는 Fig. 1과 같다. 액체저장탱크의 지진 응답은 일반 구조물의 지진응답과는 매우 다르다. 이 탱크는 지진시 발생하는 액동압, 액체의 요동 그리고 탱크 밀판의 부상을 고려해야 한다.

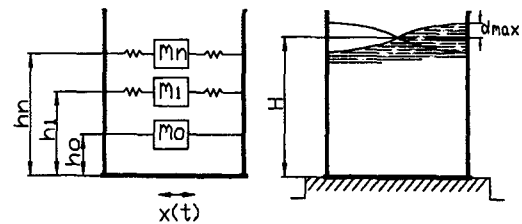


Fig. 2 Equivalent model and fluid motion

본고에서 제안하는 설계절차는 Housner^(12,13)에 의해 개발된 단순 절차에 기초하고 있고, Veletsos^(14,15)에 의해 제안된 개선안을 포함하고 있다. 이 절차는 Fig. 2와 같이 탱크가 지진을 받을 때 탱크 구조물의 운동과 조화되게 움직이는 액체운동인 충격력(진동모드 수 $n=0$)과 액체가 수직으로 요동하는 자유액면 근처에서의 입자들의 움직임인 이류력(진동모드 수 $n=1, 2, 3, \dots$)의 응답모드와 무게를 고려하고 있다.

박종률⁽¹⁶⁾은 Housner, Wozniak과 Mitchell이 개발한 방법과 다르게 지진시 탱크의 액동압 거동에 대해 유체속도퍼텐셜함수 $\phi(r, z, t)$ 를 이용하여 충격력과 이류력에 대한 액동압 및 모멘트를 수학적 방법으로 구했고, 엔지니어링 설계모델에 이용할 등가질량비 및 등가작용높이비를 제안했다. 지진을 받고 있는 탱크에 대해 동적해석을 하기 위해서는 탱크가 설치되는 특정구역에 대한 응답스펙트럼, 즉, 지반가속도, 지반감쇠 그리고 지진의 크기를 제시된 수식에 대입하면 전도 모멘트 및 최대요동높이를 구할 수 있다. 본 등가정적해석에 적용된 기초 이론은 박종률의 선행연구결과에 바탕을 두고 있다.

3.2 전도 모멘트

현실적으로 탱크가 설치될 특정구역마다 응답스펙트럼을 작성하고 이를 토대로 동적해석을 실시하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 보수적으로 등가정적해석 방법을 채용하여 탱크의 내진설계를 시행하는 것이 경제적이다. 등가정적해석방법의 기본 개념은 구조물의 질량, 가해진 지반가속도, 구조물의 동적특성, 구조물의 유연성, 그리고 구조물의 중요도에 의존되는 바닥전단(base shear)항을 사용하여 유효지진하중(effective earthquake loads)을 계산하는 것이다. 바닥전단은 등가수평하중으로서 구조물에 작용한다.

액체 저장탱크에 대한 등가정적해석은 Housner가 개발하였고 TID 7024⁽¹³⁾에 표시되어 있다.

탱크의 옆판 최하단 바닥에서의 전단력과 전도 모멘트는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$V = ZI(C_0 W_s + C_0 W_r + C_0 W_0 + C_1 W_1) \quad (1)$$

$$M = ZI(C_0 W_s X_s + C_0 W_r H_t + C_0 W_0 h_0 + C_1 W_1 h_1) \quad (2)$$

여기서,

V = 전단력(shear force, kg)

M = 전도모멘트(overturning moment, kg·m)

Z = 지진구역계수(seismic zone factor)

I = 중요도계수(importance factor)

C_0, C_1 = 수평력계수(lateral force coefficient)

W_s = 탱크옆판무게(weight of tank shell, kg)

W_r = 탱크지붕무게(weight of tank roof, kg)

W_0 = 충격력 질량의 유효무게(effective weight of impulsive mass, kg)

W_1 = 이류력 질량의 유효무게(effective weight of convective mass, kg)

X_s = 탱크옆판 무게중심높이(height from the bottom of the tank shell to the shell's center of gravity, m)

H_t = 탱크옆판높이(total height of the tank shell, m)

h_0 = 충격력 작용높이(height from the bottom of the tank shell to the centroid of impulsive mass, m)

h_1 = 이류력 작용높이(height from the bottom of the tank shell to the centroid of convective mass, m)

3.3 한반도 지진구역도 및 지진구역계수(Z)

한반도의 지진위험도에 관한 연구⁽¹⁷⁾는 1971년 이후 원자력발전소 부지의 지진안전성확보를 위해 각 부지별로 지진위험도 검토가 시행되어 왔다.

그 동안 결정된 최대지진가속도(g 값)은 계기지진만 고려할 때는 $0.2g$ 로 하면 안전하다는 결론이었다. 그러나, 역사지진을 고려할 때는 $0.26g$ (재현주기는 경상지역에서 240년)로 채용하는 것이 안전할 것이라고 추론되었다. 또한, 통계적 방법에 의한 재현주기 500년의 최대지진가속도는 계기지진만 사용할 경우는 $0.25g$ 이하이고, 계기지진도와 역사지진도를 모두 사용할 경우는 $0.10g$ 이하로 추정했다. 이상의 g 값의 안전성에 관해서는 그 동안 국내학자들(김소구, 엄상호, 유상철, 한양대 환경연구소 등)간에 이견이 있었고, 역사지진가속도, 계기지진가속도, 통계학 방법에 의한 지진가속도의 지진위험도가 차이가 나고 있는 바,

1987년 건설부에서 미국과 같이 통계학적방법에 의해서 계산된 한반도 지진구역도(지진위험도) 및 구역지진가속도를 발표했다. 본 연구에서는 건설부안을 채용하는 것이 적합하다고 판단한다.

설계 지진은 일반적으로 재현주기 475년에 해당하는 50년에 지진발생확률 10%의 지진으로 정의된다. 이런 정의 뒤에는 시설의 수명이 50년이라는 가정이 있다. 건설부안에서 지진구역계수(seismic zone factor) Z 는 그 구역에서 50년 동안 10% 이상 발생할 가능성이 있는 유효최대지진가속도를 나타낸다. 한반도 지진구역도 및 지진구역계수는 Fig. 3에 보여주고 있다. 구역 0은 $Z=0.04$, 구역 1은 $Z=0.08$, 구역 2는 $Z=0.12$ 이다. 그러나 한반도 내에서 지진의 위험이 전혀 없는 지역이 없다는 것에 유념할 필요가 있다.

3.4 시설의 중요도 계수(I)

중요도계수(importance factor) I 는 지진시 이 구조물이 지탱하는 것이 얼마나 중요한가를 계수로 나타낸 것이다. 지진의 재현주기 500년을 기준으로 해서 매우 중요한 시설이 아닌 경우 보통 탱크에 대해서는 $I=1.0$ 을 취한다. 그리고 I 값은 시설의 위험도 및 중요도에 따라 증가시킬 수 있는데, UBC code에서는 석유저장탱크는 위험시설(hazardous facility)로 분류하여 $I=1.25$ 를 취하도록 하고 있으며 이는 재현주기 750년에서의 I 값에 해당한다(Table 1).

3.5 수평력 계수(C_0, C_1)

수평력계수 C_0 과 C_1 는 최대확대지반운동을 나타내는 계수이다.

C_0 는 액체-탱크계(fluid-tank system)의 강체 구조에 대해 충격효과시 최대확대지반운동의 정도를 나타내는 계수로 지진계수(seismic factor)와 응답확대계수(response amplified factor) 및 감쇠비 2%의 감쇠보정계수의 곱으로 표시된다. 지진계수는 한반도의 지반의 종류와 지진구역계수에 따라 값이 최소 0.05에서 최대 0.22까지이며, 응답확대계수는 각 지역의 지진위험도 및 지반의 성질을 고려하여 작성된 표준설계 응답스펙트럼에 의해 결정되는데 국내의 가스시설의 내진성능기준(안)⁽¹⁸⁾에 제시된 설계용 응답스펙트럼에서는 2.5를 사용하고 있다. 2% 감쇠비의 감쇠보정계수는 1.35이다.

따라서 국내의 경우 강제석유탱크에 대해서는 C_0 는 최대 $0.74(=0.22 \times 2.5 \times 1.35)$ 의 값을, 평균 $0.44(=0.13 \times 2.5 \times 1.35)$ 의 값을 가질 것이라고 추정할 수 있다. UBC code에서는 어떤 토양 계수를 포함하지 않고 최대 $0.60(=0.24 \times 2.5 \times 1)$ 으로 일관되어 있으며(다른 건물은 0.5이다), API standard 650에서는 0.6를 채용하고 있다. 본 연구에서도 국내의 경우도 0.6을 채용하는 것이 합당하다고 판단한다.

충격효과에서는 액체가 주위의 구조물과 조화되지 움직이기 때문에 진동주기는 고려하지 않고 단지 지반운동에 상응하는 설계 가속도만 사용하여 수평력을 계산한다. 이것을 Tong⁽⁸⁾은 영주기가속도(ZPA: zero period acceleration)를 사용하여 액체의 운동량을 구한다고 표현했다.

API standard 650에서 채용한 C_1 의 값은 최대스펙트럼속도가 45.72cm/sec에서 70.1cm/sec 사이와 최대스펙트럼변위가 33.53cm에서 50.3cm 사이에 있는 것에 기초했는데 이는 토양 형태에 의존된다.

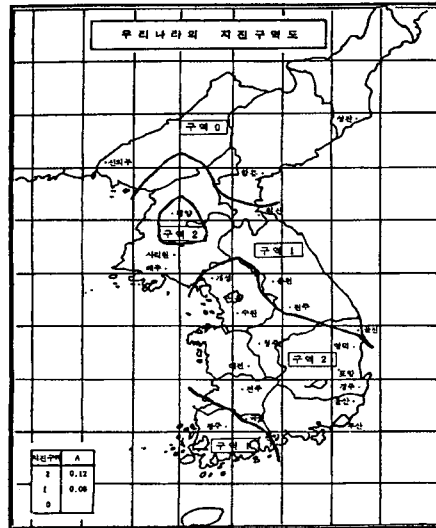


Fig. 3 Seismic zone map

Table 1 Importance factor (I)

Return Period (year)	50	100	200	500	1,000	2,400
I	0.4	0.57	0.73	1	1.4	2

최근에 조사된 인천 LNG 인수기지 주변의 설계 지진 응답스펙트럼에서는 속도가 35.6cm/sec에서 63.5cm/sec 정도이고 변위는 25.4cm에서 50.8cm 및 변위 범위 안에 있으므로 본 고에서도 API standard 650의 절차를 사용하고자 한다.

C_1 의 계산은 이류 전단력과 관련이 있으며 특정지반에서의 가속도를 표준지반가속도로 산정하기 위해서는 제1차 액체요동모드의 고유진동수의 결정과 구역확대계수 S 을 요구한다. 액체요동모드의 진동은 비교적 길고 상응하는 스펙트럼 가속도 값은 특정구역의 최대 스펙트럼 가속도 혹은 변위 범위 안에 있다. 제1차 액체요동주기⁽¹⁶⁾는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{1.8412 \frac{a}{a} \tanh\left(1.8412 \frac{H}{a}\right)}} \quad (\text{sec.}) \quad (3)$$

$T \leq 4.5$ 인 경우,

$$C_1 = \frac{0.75S}{T} \quad (4)$$

$T > 4.5$ 인 경우,

$$C_1 = \frac{3.375S}{T^2} \quad (5)$$

여기서, S 는 UBC code에서 원용했으며, Table 2에 있다.

Table 2 Site coefficients (S)

Type	Description	S
S_1	A soil profile with either a) a rock-like material characterized by a shear wave velocity greater than 762 m/s or by other suitable means of classification or b) stiff or dense soil conditions where the soil depth is less than 60.96 m	1.0
S_2	A soil profile with stiff or dense soil conditions where the soil depth exceeds 60.96 m	1.2
S_3	A soil profile 12.192 m or more in depth containing more than 6.96 m of soft to medium stiff clay but more than 12.96 m of soft clay	1.5
S_4	A soil profile containing more than 12.192 m of soft clay	2.0

3.6 등가질량비와 등가무게

박종률⁽¹⁶⁾는 충격효과와 이류효과에서 등가질량비를 유도하였다. 이류효과에서는 1차 모드($n=1$)에서 3차 모드($n=3$)까지의 합과 제1차 요동모드의 차이가 약 2~3% 정도가 나지만 단순화를 위해 제1차 모드만 고려하였다.

충격등가질량비 $\frac{m_0}{m_i}$ 는

$$\frac{m_0}{m_i} = \frac{H}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{[(2n-1)\pi]^3} \times \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]} \quad (6)$$

이류등가질량비 $\frac{m_1}{m_i}$ 는

$$\frac{m_1}{m_i} = \frac{a}{H} \frac{2}{1.8412(1.8412^2-1)} \tanh\left(1.8412 \frac{H}{a}\right) \quad (7)$$

식 (6)와 식 (7)의 결과는 Fig. 4와 같다.

따라서, 충격무게와 이류무게는 식 (8)과 같다.

$$W_0 = W_i \times \frac{m_0}{m_i}, \quad W_1 = W_i \times \frac{m_1}{m_i} \quad (8)$$

여기서, W_i 는 탱크내용액의 전체무게이다.

3.7 등가작용높이비와 등가높이

박종률⁽¹⁶⁾는 충격효과와 이류효과에서 등가작용높이비를 유도하였다. 이류효과에서는 제1차 요동모드만 고려하였다.

충격질량 등가작용높이비 $\frac{h_0}{H}$ 는

$$\frac{h_0}{H} = 1 + \frac{m_i}{m_0} \left[-\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{64(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^3} \frac{H}{a} \times \frac{I_1\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]}{I_1'\left[(2n-1)\frac{\pi}{2}\frac{a}{H}\right]} \right] \quad (9)$$

이류질량 등가작용높이비 $\frac{h_1}{H}$ 는

$$\frac{h_1}{H} = 1 - \frac{1}{1.8412} \frac{a}{H} \tanh\left(\frac{1.8412}{2} \frac{H}{a}\right) \quad (10)$$

따라서, 상기 식에서 충격중심높이와 이류중심 높이를 구할 수 있다. 식 (9)와 식 (10)의 결과는 Fig. 5와 같다.

4. 옆판의 압축응력

4.1 앵커가 설치된 탱크의 옆판 압축

탱크는 앵커가 설치되지 않았지만 지진에 의해 밀판이 부상(uplift)되지 않는 탱크와 앵커가 설치된 탱크에 대해 탱크 옆판의 바닥(가장 아래)에서 옆판의 수직방향 최대 압축응력은 보의 굽힘식 ($\sigma = My/I$) 을 사용하여 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$b = w_t + \frac{4M}{\pi D^2}, \quad \sigma = b/t_b \tag{11}$$

여기서,

b = 옆판의 수직방향 압축력 (kg/mm)

σ = 옆판의 압축응력 (kg/mm²)

w_t = 옆판의 단위길이 당 수직방향 무게(kg/mm)

M = 진도모멘트 (kg·mm)

D = 탱크의 직경 (mm)

t_b = 최하단 옆판의 두께 (mm)

4.2 앵커가 안 된 탱크의 옆판 압축

앵커가 설치되지 않은 탱크의 경우, Wozniak⁽⁵⁾가 API standard 650, Appendix E에서 제안한 해석 방법은 지진 시에 탱크는 지반에서 탱크 밀판이 충분히 분리되며 이 분리가 탱크 밀판에서 소성 힌지를 유발하도록 발달된다는 가정에 기초하고 있기 때문에 탱크 밀판의 부상(lift-off)을 저지하는데 있어 저장 액체의 무게의 기여를 과대 평가하는 결과를 낼 수 있다.

Leon과 Kausel⁽¹⁹⁾은 이러한 API standard 650의 개략적인 해석모델을 더 발전시켰다.

Fig. 6과 같이 원통형 탱크의 경우 밀판의 부상에 기여하는 유체의 무게는 초승달 형태의 영역(crescent-moon-shaped region) 위에 작용한다. 이 영역 안에서 단위 원호길이 당 유체 무게는 그 초승달의 원호 폭에 비례하고 초승달의 양 끝으로 갈수록 0(zero)으로 감소한다.

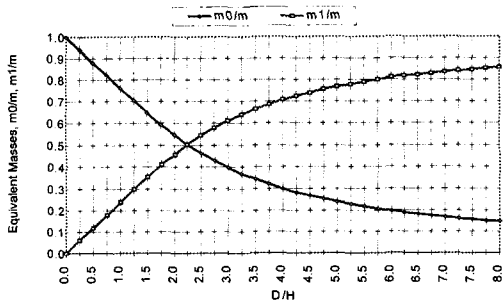


Fig. 4 Equivalent masses

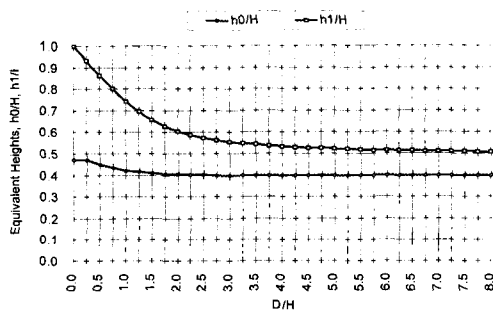


Fig. 5 Equivalent heights

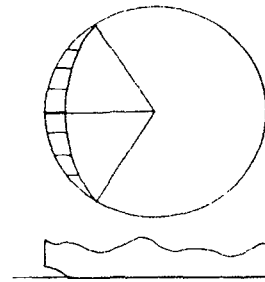


Fig. 6 Fluid area contributing to resistance

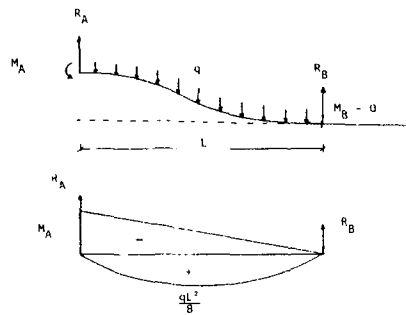


Fig. 7 Equilibrium diagram for lifted bottom plate

Fig. 7에서 탱크 옆판과 밀판이 만나는 점, A에서 탄성한계에 도달할 때의 부상변위 u_A , 단위길이당 모멘트 M_A , 단위길이당 반력 R_A 및 변위범위 L 는 다음과 같다.

$$u_A = \frac{3}{8} \frac{f_y^2 t}{E q} \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

$$M_A = \frac{1}{4} f_y t^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{mm}/\text{mm}) \quad (13)$$

$$R_A = t \sqrt{\frac{2}{3} q f_y} \quad (\text{kg}/\text{mm}) \quad (14)$$

$$L = t \sqrt{\frac{3}{2} \frac{f_y}{q}} \quad (\text{mm}) \quad (15)$$

여기서,

q = 단위면적당 유체의 무게 (kg/mm^2)

f_y = 밀판의 항복응력 (kg/mm^2)

t = 밀판의 두께 (mm)

E = 밀판의 탄성계수 (kg/mm^2)

따라서 앵커가 설치되지 않아 밀판이 부상되는 경우 옆판에 작용하는 압축력 및 압축응력은

$$b = w_t + \frac{4M}{\pi D^2} + R_A, \quad \sigma = b / t_b \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (16)$$

로 주어진다. 그러나 반력 R_A 는 옆판에 압축하중으로 작용하고 어느 크기에 도달하기도 전에 옆판의 국부 좌굴을 일으킬 수도 있다.

5. 옆판의 허용좌굴응력

5.1 탱크바닥에서의 유체 횡압

탱크 바닥에서의 유체정압과 지진의 수평향과 수직향을 포함하는 전체 압력은 식 (17)과 같다.

$$P_{\max, \min} = P_{\text{static}} + P_{\text{horizontal}} \pm 0.4P_{\text{vertical}} \quad (17)$$

계수 0.4는 수평향과 수직향의 최대압력은 동시에 일어나지 않는다는 가정을 고려하기 위해 도입되었다.

탱크 밀판에 작용하는 정압은

$$P_{\text{static}} = \rho_l g H + P_0 \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (18)$$

지진의 수평향에 의한 탱크바닥에서의 압력은 충격력과 이류력(요동압력)으로 구성되어 있다. 이들 압력은 식 (1)에서 얻는다.

$$P_{\text{horizontal}} = ZI(C_0 W_0 + C_1 W_1) \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (19)$$

지진의 수직 방향의 압력은 수직응답가속도에 의해 생긴 것이지만 KS B 6225의 추천과 같이 연직 방향의 진도를 수평 진도의 1/2로서 정하중에 곱하여 구한다.

$$P_{\text{vertical}} = ZI C_0 \left(\frac{1}{2} P_{\text{static}} \right) \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (20)$$

따라서 탱크바닥에서의 전체 횡압력은

$$P_{\max, \min} = \rho_l g H + P_0 + ZI(C_0 W_0 + C_1 W_1) \pm ZI C_0 \frac{(\rho_l g H + P_0)}{5} \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (21)$$

5.2 코끼리 발형 허용좌굴응력

지진과 중력하중하에서 탱크 옆판은 주로 전도 모멘트에 의해 생긴 수직압축응력과 내압과 액동압에 의한 인장응력으로 구성된 2축응력을 받고 있다. 탱크의 바닥 근처 옆판에는 높은 유체 압력이 옆판의 원주방향 변형을 일으키는데 이는 비대칭적이고 축방향 면에서 굽힘응력을 일으킨다. 이것은 탱크 바닥 근처에서 매우 가까운 높이, $\Delta H = 0.04L$ 에서 탱크 옆판의 360° 전부를 부풀어오르게 한다.⁽⁷⁾ 이런 현상을 코끼리 발형 좌굴이라 한다. 직립형 탱크의 이 좌굴수용력은 이런형의 좌굴에 의해 지배받는 것이 대부분이다. 좌굴 수용력에 관해서 강성의 효과는 보수적으로 무시된다.

코끼리 발형 좌굴형에서의 허용좌굴응력 σ_e 은 다음 식⁽⁹⁾으로 주어진다.

$$\sigma_e = \frac{0.6 E t_b}{R} \left\{ 1 - \left(\frac{P_{\max} R}{\sigma_y t_b} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{1}{1.12 - S_1^{1.5}} \right) \times \left(\frac{S_1 + \sigma_y / 25.308}{S_1 + 1} \right) \quad (\text{kg}/\text{mm}^2) \quad (22)$$

여기서,

R = 탱크의 반경 (mm)

σ_y = 옆판의 항복응력 (kg/mm^2)

E = 옆판의 탄성계수 (kg/mm²)
 t_b = 옆판의 최하단의 두께 (mm)
 $S_1 = (R/400t_b)$

어떠한 경우도 좌굴에 대한 안전도를 확보하기 위해서는 $\sigma_e \leq \sigma_y$ 인 조건이 만족되어야 한다.

5.3 다이아몬드형 좌굴 허용응력

지진을 받고있는 탱크에 일어날 수 있는 또 다른 좌굴형태는 막응력을 받고 있는 다이아몬드형 좌굴이다. 이 좌굴 형태에서 허용좌굴응력 σ_d 는 다음식⁽⁹⁾으로 보수적으로 추정할 수 있다.

$$\sigma_d = (0.6\gamma + \Delta\gamma) \frac{Et_b}{R} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (23)$$

여기서,

$$\phi = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t_b}}$$

$$\gamma = 1 - 0.73(1 - e^{-\phi})$$

$\Delta\gamma$ 는 내압에 의한 증가계수이며 Fig. 8에서 구할 수 있다.

어떠한 경우도 좌굴에 대한 안전도를 확보하기 위해서는 $\sigma_d \leq \sigma_y$ 인 조건이 만족되어야 한다.

5.4 설계허용좌굴응력

설계에 적용할 수 있는 설계허용좌굴응력은 일반적으로 설계허용좌굴응력은 고전적인 임계좌굴응력에 보정치와 안전율을 곱한 값을 사용한다.

식 (22)과 식 (23)에서 왼쪽의 $\sigma_{cr} = 0.6 Et_b / R$ 는 고전적인 임계좌굴응력이다.

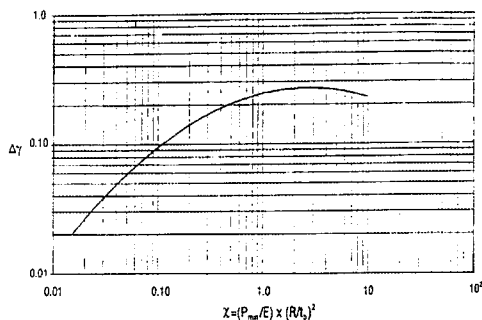


Fig. 8 Stability factor due to internal pressure

Crate의 실험⁽⁵⁾에 의하면 내압이 있는 탱크에 대한 최대허용좌굴응력은 $\frac{P}{E} \left(\frac{R}{t}\right)^2$ 의 무차원값이 0에서 0.1028로 증가하면 고전적인 임계좌굴응력의 2배까지 증가하고 있다. 이를 근거로 API standard 650에서는 안전율 1.5를 감안하여 최대허용좌굴응력 F_a 를 다음과 나타냈다.

$$GHD^2/t^2 \geq 43.8912 \text{ 인 경우,}$$

$$F_a = 8.437 \frac{t}{D}$$

$$GHD^2/t^2 < 43.8912 \text{ 인 경우,}$$

$$F_a = 3.37488 \frac{t}{D} + 0.76412\sqrt{GH}$$

여기서,

- G = 액체의 비중 (무차원)
- H = 탱크의 높이 (m)
- D = 탱크의 내경 (m)
- F_a = 허용좌굴응력 (kg/mm²)
- t = 옆판의 최하단의 두께 (mm)

그러나 API standard 650에서 명기된 최대허용좌굴응력 F_a 은 비교적 작은 탱크(직경 약 7m 이내)에 적용할 수 있고 대형 탱크에의 적용에는 다소 무리가 있다.⁽⁵⁾

식 (22)와 식 (23)은 고전적인 임계좌굴응력에 탱크의 내압, 내경 및 재료의 항복응력을 감안하여 Rotter에 의해 경험적으로 얻어진 식으로 API standard 650의 식 보다 더 일반적인 식으로 평가되고 있다. Haroun(9)은 이 수식을 이용하여 직경 39.3m, 높이 39.9m인 대형 액체천연가스탱크에 대한 내진평가에 안전율 1.4를 적용해서 활용했다.

본 고에서도 설계허용좌굴응력을 코끼리 발형 허용좌굴응력 및 다이아몬드형 허용좌굴응력 중 작은 값의 72%(안전율 1.4)를 적용하는 것이 적당하다고 사료된다. 즉, 설계허용좌굴응력, σ_b 는

$$\sigma_b = 0.72 \times \text{least of } (\sigma_e, \sigma_d) \quad (24)$$

이다.

6. 결론

본고는 KS B 6225(강제석유저장탱크의 구조)에서 미진한 내진설계에 대한 설계기준안 및 절차를 선행연구에 근거하여 제안한 것이다. 제시한 Figs. 및 수식들은 기존의 설계규격보다 좀 더 진보된 연구결과를 반영하고 있고, 국내 지진특성을 고려한 계수들을 제시했다.

적용사례에 대한 결과 및 고찰은 제시하지 않았으나 매우 보수적인 결과를 얻었다.

본 기준안 및 절차서는 기존의 규격을 보완할 수 있는 대안 중 하나이며, 내진 설계에 적용해도 될 것으로 판단한다.

참고문헌

- (1) Rinne, J. E., 1967, "Oil Storage Tanks," The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964 and Aftershocks, Vol. II, Part A, ESSA, U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey.
- (2) Hanson, R. D., 1973, "Behavior of Liquid Storage Tanks," The Great Alaska Earthquake of 1964, Engineering, National Academy of Sciences, Washington, D. C.
- (3) Jennings, P. C., 1971, "Damage of Storage Tanks," Engineering Features of the San Fernando Earthquake, Earthquake Engineering Research Laboratory, Cal. Tech.
- (4) Husid, R., Espinosa, A. F. and Casas, J. de las, 1977, "The Lima Earthquake of October 3, 1974: Damage Distribution," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 67, No. 5, pp. 1441~1472.
- (5) Wozniak, R. S. and Mitchell, W. W., 1978, "Basis of Seismic Design Provision for Welded Steel Oil Storage Tanks," *Proceedings-Refining Department*, American Petroleum Institute, Washington, D.C., Vol. 57, pp. 485~501.
- (6) Zeng, X., 1993, "Earthquake Response Analysis of Unanchored Cylindrical Liquid Storage Tanks," Ph.D Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada.
- (7) Poole, A. B., 1994, "Simplified Design and Evaluation of Liquid-Storage Tanks Relative to Earthquake Loading," PVP-Vol. 275-2, ASME, *Seismic Engineering*, Vol. 2, pp. 111~116.
- (8) Tong, W. H., 1998, "Seismic Issues of Vertical Flat Bottom Storage Tanks," *EQE International*, Inc. Irvine, California, USA.
- (9) Haroun, M. A., El-Zeiny, A. A., and Bhatia, H., 1994, "Seismic Design Guidelines for Liquefied Natural Gas Tanks," PVP-Vol. 272, *Sloshing, Fluid-Structure Interaction and Structural Response Due to Shock and Impact Loads*, ASME, pp. 43~49.
- (10) 鶴戸口, 1987, JIS石油貯槽, 日本規格協會, pp. 318~320.
- (11) ASCE, 1997, "Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities," pp. 4-5~4-23.
- (12) Housner, G. W., 1955, "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers," *Bulletin of The Seismological Society of America*, pp. 15~35.
- (13) Housner, G. W., 1963, "Nuclear Reactors and Earthquakes," TID-7024, U.S. Atomic Energy Commission, pp. 183~209, 367~390.
- (14) Veletsos, A. S., 1974, "Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks," *Proceeding of International Association for Earthquake Engineering*, pp. 630~639.
- (15) Veletsos, A. S. and Yang, J. Y., 1977, "Earthquake Response of Liquid Storage," *ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, pp. 255~365.
- (16) 박종률, 2001, "수학적 해석 방법에 의한 액체저장탱크의 액동압 거동 해석," 대한기계학회 2001년 춘계학술대회논문집 A권, pp. 628~635.
- (17) 한국에너지연구소, 1982, "한반도의 지진위험도(Seismic Risk Map of Korea)," 1982년도 연구보고서, KAERI/RR-380/82.
- (18) 한국가스안전공사, 1998, 가스시설의 내진전문과정 교재, pp. 4-6~4-59.
- (19) Leon, G. S. and Kausel, E. A. M., 1986, "Seismic Analysis of Fluid Storage Tanks," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 1~18.